



円筒形貯槽の座屈・振動特性を考慮した耐風設計法に関する研究

著者	安永 隼平
号	62
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5528号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00125060

氏 名	やすなが　じゅんぺい
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成30年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）都市・建築学専攻
学 位 論 文 題 目	円筒形貯槽の座屈・振動特性を考慮した耐風設計法に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 植松 康
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 植松 康 東北大学教授 木村 祥裕 東北大学教授 五十子 幸樹

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

本研究では，強風中で円筒形貯槽に作用する風力の特性ならびにその座屈・振動特性を明らかにし，構造安全性を合理的に確保することができる耐風設計法を提案することを目的とする。円筒形貯槽は曲げ加工された鋼板の壁面で構成されるシェル状の容器構造物である。半径と板厚の比（以下，「径厚比」）は一般的に 500～2500 程度であり非常に薄肉である。壁面の面外剛性が低い場合，強風によって座屈（壁面が面外方向に大きく変形する現象）が発生する可能性があり，これまでも複数の被害事例が報告されている。強風被害は，空の状態のオープントップオイルタンクの座屈と，建設中で屋根のない状態における円筒形貯槽の座屈の 2 種類に分類される。オープントップオイルタンクについては，米国の API Standard 650 において設計法が示されており，図 1 に示すウインドガーダーによって耐風性能の向上が図られている。しかし，一様外圧を受ける円筒殻の座屈耐力によって設計指標が定められており，実際の自然風中において壁面に働く風圧性状は考慮されていない。また，建設中で屋根のない状態に対する耐風設計法は構築されていない。上述の円筒形貯槽の強風被害を防止するためには，強風中で壁面に働く風力の特性を明らかにし，座屈・振動特性を適切に考慮した耐風設計法を確立する必要がある。

第2章 風力の分布・変動特性に関する風洞実験

風洞内において剛模型を用いた多点風圧測定を行い，風力の分布・変動特性を調査した（図 2）。風圧測定模型の寸法は，アスペクト比 $H/D = 0.25, 0.5, 1.0$ の 3 種類とした。単体のケースに加えて，それぞれの模型と同一形状のダミー模型を風圧測定模型周辺に配置し，連棟配置による風力分布の変化を把握した。連棟配置のパターンは直線配置，正三角形配置および正方形配置の 3 種類である（図 3）。それぞれのケースに対して得られた風圧の時刻歴データを用いて，各種統計解析，POD 解析，条件付きサンプリングを適用し，風圧の時間的・空間的変動特性，外圧と内圧の相関等を把握した。風圧の相関係数分布を求めた結果，風上領域での外圧および内圧は比較的高い相関をもって変動していることが明らかになった。図 4 に，風上よどみ点での外圧が最大ピー

ク値をとるときの瞬間的な風圧分布(条件付き風圧係数分布)の周方向分布を示す。条件付き風圧係数分布は、風上側正面に関して大きな非対称性は示さず、平均風力係数分布に概ね相似である。また、連棟配置の中で、円筒形貯槽の配置線に直交するような風向では、風上側の正圧範囲が増大すると共に、内圧が減少するため、壁面に作用する正味の風力が大きくなる(図5)。

第3章 静的風力による座屈特性

第2章の平均風力係数分布を用いて、円筒殻に関する座屈固有値解析および幾何学的非線形解析を行った。円筒殻の基本的な座屈性状、ならびに連棟配置による風力分布の変化が座屈特性に及ぼす影響を明らかにした。実験で得られた平均風力係数分布をそのまま用いた解析では、周方向分布を高さ方向に平均した平均風力係数分布を用いた解析に比べて無次元座屈荷重 $\lambda_{cr}(=p_{cr}R^3/D_b$, p_{cr} :座屈荷重, R :半径, D_b :円筒殻の曲げ剛性)が増加した。したがって、高さ方向に平均した平均風力係数分布を用いることで安全側に座屈荷重を評価できるといえる。図5に示した風力係数分布に対する無次元座屈荷重 λ_{cr} を表1に示す。これより幾何学的非線形解析と座屈固有値解析における座屈特性は類似しており、座屈固有値解析によって簡易的に座屈現象を捉えることが可能であることが分かる。さらに、無次元座屈荷重は、連棟配置による影響を受けて風上における正の風力の範囲が増大するほど減少するが、側面や背面における風力係数分布の影響は小さいことが明らかになった。

第4章 変動風力が座屈特性に及ぼす影響

弾性試験体を用いた座屈実験を風洞中で実施した。併せて、風力係数分布の時刻歴を用いて、タンク壁面の時刻歴応答解析を実施し、壁面の振動中に発生する動的座屈特性を調査した。座屈発生時における瞬間的な風圧分布に着目して、

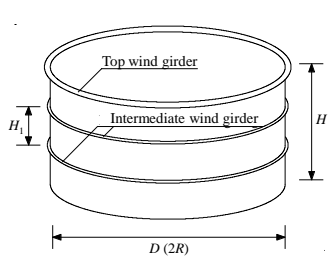


図1 オープントップオイルタンク

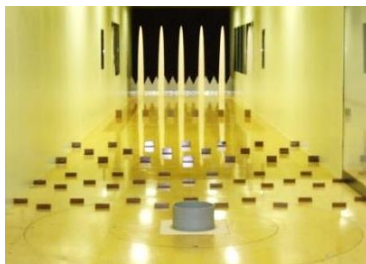


図2 風圧測定実験

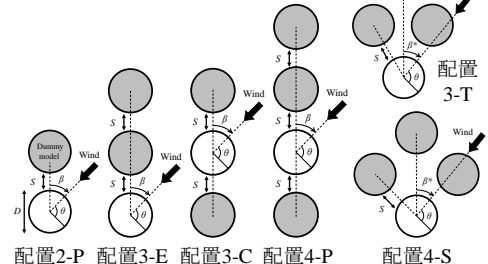


図3 風圧測定実験

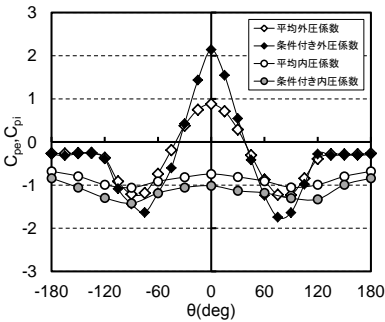


図4 条件付き風圧係数分布
($H/D=0.5$, 配置 2-P, $S/D=1.0$, $\beta=90^\circ$)

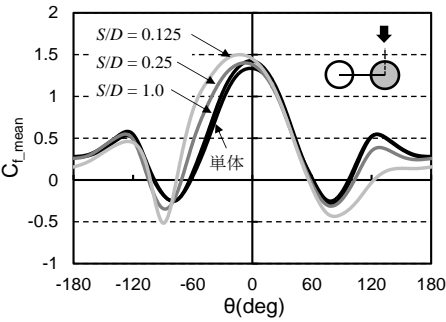


図5 平均風力係数分布
($H/D=0.5$, 配置 2-P, $\beta=90^\circ$)

表1 無次元座屈荷重 $\lambda_{cr}(H/D=0.5)$

		幾何学的 非線形解析	座屈 固有値解析
Isolated		704	708
配置2-P	$S/D = 1.0$	705	706
	$S/D = 0.5$	698	700
	$S/D = 0.25$	690	691
	$S/D = 0.125$	678	679

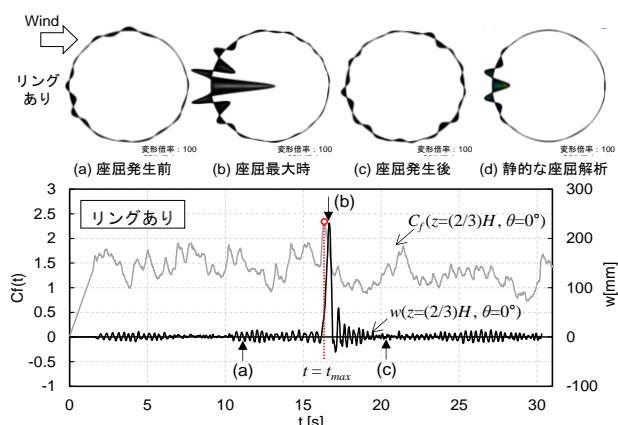


図6 法線方向変位 w と風力係数 C_f の時刻歴
(鋼製タンク, $H/D=0.92$)

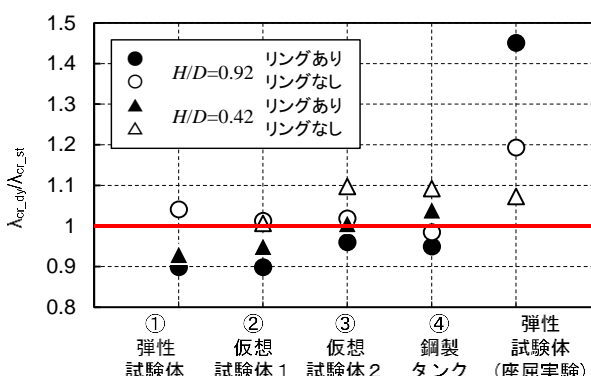


図7 無次元動的座屈荷重

第3章に示した静的座屈特性と比較することで、変動風力による動的な座屈現象を考察した。座屈実験では、動的座屈荷重が静的座屈荷重より大きくなった。一方、時刻歴応答解析では、動的座屈荷重が静的座屈荷重より幾らか小さくなった。これは、解析では簡略化のために高さ方向に一樣な変動風力を与えた(高さ方向に完全相関と仮定した)ことが原因と考えられる。また、壁面振動中の座屈は風上よどみ点での外圧が最大ピーク値をとるときに発生していることが明らかになった(図6)。図7に無次元動的座屈荷重 λ_{cr_dy} を示す。それぞれ幾何学的非線形解析における無次元静的座屈荷重 λ_{cr_st} で基準化している。座屈実験における $\lambda_{cr_dy}/\lambda_{cr_st}$ の増大は、時刻歴応答解析における $\lambda_{cr_dy}/\lambda_{cr_st}$ の低下に比べて絶対値で大きい。実現現象では $\lambda_{cr_dy}/\lambda_{cr_st} > 1.0$ となると考えられる。また、風荷重を受ける円筒殻の静的座屈荷重は、一様外圧を受ける円筒殻の座屈荷重と同様に曲率パラメータを用いて評価することが可能であることを示した。さらに、実際の鋼製タンクとして想定される仕様の範囲では、座屈発生時に壁面内の応力度がいずれも弾性範囲内にあった。以上の検討結果から、弾性体を仮定した静的座屈荷重評価式を用いて、動的な座屈現象を安全側に評価可能であることが明らかになった。

第5章 座屈特性に対する補剛リングの効果

第2章で得られた平均風力係数分布を用いて、補剛リングの曲げ剛性・ねじり剛性をパラメータとした座屈固有値解析を実施し、補剛リングの設計に必要な指標を検討した。タンク壁面の座屈に対してリングのねじり剛性の影響は小さいが、曲げ剛性の影響は大きく、その傾向は壁面の曲げ剛性との比(曲げ剛性比 $\phi = EI_x/D_bH$, E : ヤング係数, I_x : リングの断面二次モーメント, H : 壁面の高さ)によって表すことができる(図8, ここで、 λ_{cr0} : リングなしの無次元座屈荷重)。中間リングは壁面の中央に設置した方が座屈荷重の向上に効果的であり、中間リングの本数と座屈荷重は線形関係にあることを示した。また、リングに働く曲げモーメントに関する理論計算を行い、リングが風荷重によって降伏しないための条件を提案した。頂部リングおよび中間リングの断面係数は、リングに作用する軸力およびモーメントに対して、許容応力度設計に基づき決定できる。

第6章 壁面振動に伴う疲労損傷の照査

第2章で得られた風力係数分布の時刻歴を用いて時刻歴応答解析を行い、壁面内に働く応力度の時刻歴に対してレイ

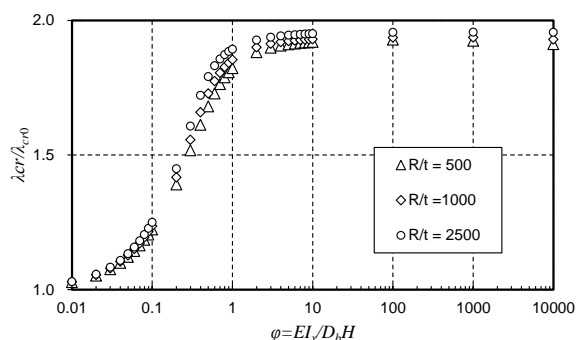


図 8 曲げ剛性比と無次元座屈荷重の関係

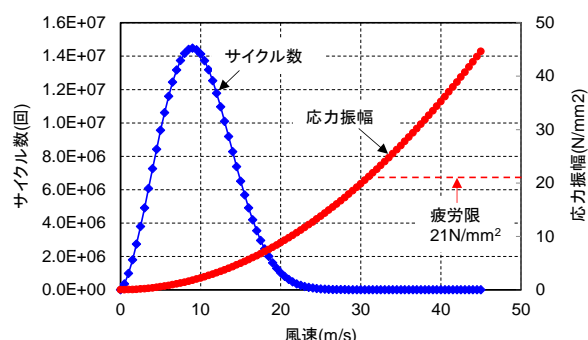


図 9 風速と応力度のサイクル数および応力振幅の関係

表 2 提案する耐風設計手法の分類

手法	設計用風荷重を用いた F E M 解析により設計 静的座屈荷重の評価式を用いて補剛リングおよび壁面の板厚を設計	対象	
		オープントップ オイルタンク	建設中の 円筒形貯槽
		手法 1 - A	手法 1 - B
		手法 2 - A	手法 2 - B

ンフロー法を適用することで、応力度の変動特性を調査した。疲労損傷の想定される箇所として、壁面の溶接部、付属物の溶接部を挙げ、マイナー則による疲労照査を実施した。供用期間を 50 年とした場合の発生風速と応力度のサイクル数および応力振幅の関係を図 9 に示す。壁面に作用する応力度は非常に小さく、累積疲労損傷度は $D = 1.31 \times 10^{-5}$ であった。対象とする円筒形貯槽の一般的な仕様の範囲内では、累積疲労損傷度が 1.0 に対して十分に小さくなることから、供用期間中における疲労損傷は発生しないことを確認した。すなわち、耐風設計において疲労損傷の照査は不要であることが明らかになった。

第 7 章 耐風設計手法の提案

第 2 章から第 6 章で得られた知見を基に、オープントップオイルタンクおよび建設中の円筒形貯槽を対象とした耐風設計法をそれぞれ提案した。円筒形貯槽の座屈は弾性範囲内で発生するため、座屈発生後も材料が弾性範囲内であれば、弾性座屈前の状態に戻る。しかし、座屈発生時には円筒形貯槽の周辺の付属物が損傷する可能性がある。本研究では円筒形貯槽の継続的な利用を目的とするため、静的風荷重に対して壁面の座屈が発生しないことを設計のクライテリアとした。設計手法としては、設計の目的に合わせて手法を選択できるように、設計用風荷重を用いた F E M 解析により設計する手法と、静的座屈荷重の評価式を用いて補剛リングおよび壁面の板厚を設計する手法の 2 種類を提案した(表 2)。

第 8 章 結論

本論文での主な結論をまとめた。本研究では、円筒形貯槽に作用する風力の特性および壁面の座屈・振動特性を考慮した耐風設計法を提案することで、円筒形貯槽の構造安全性を合理的に確保することを可能とした。オープントップオイルタンクについては、従来の API Standard 650 による設計法よりも経済的な耐風設計が可能となった。さらに、建設中の円筒形貯槽については、より簡便な静的座屈荷重の評価式を用いた耐風設計法を提案することで、設計者が簡易的に強風による建設中の座屈発生有無を判断することが可能となった。

論文審査結果の要旨

円筒形貯槽は薄肉の鋼板の壁面で構成され、壁面の面外剛性が低いため強風によって座屈が発生する可能性があり、これまで複数の被害事例が報告されている。強風被害は、空の状態のオープントップオイルタンクの座屈と、建設中で屋根のない状態における円筒形貯槽の座屈の2つに分類される。本研究は、円筒形貯槽に作用する風力特性と座屈・振動特性を明らかにし、強風被害を防止するための耐風設計法を構築したものであり、全8章で構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、風力の分布・変動特性について述べている。風圧測定実験により壁面に働く風力分布特性を調査した。単体模型に加えて同一形状のダミー模型を配置した複数模型を用いて測定を用い、連棟配置が風力分布に及ぼす影響を把握した。風上よどみ点での外圧が最大ピーク値をとるときの瞬間的な風力分布は平均風力分布に概ね相似であることを示した。また、直列配置された円筒形貯槽においては、配置線に直交する風向で風上側の正圧とその範囲が増大すると共に内圧が減少するため、壁面に作用する風力が大きくなることを示した。

第3章では、静的な風力による壁面の座屈特性を明らかにしている。第2章の結果を用いて座屈固有値解析および幾何学的非線形解析を行い、円筒殻の基本的座屈性状と連棟配置による風力分布の変化が座屈特性に及ぼす影響を把握した。座屈荷重は風上における正の風力範囲が増大するほど低下するが、側面や背面における風力分布の影響は極めて小さいことを示した。

第4章では、弾性試験体を用いた座屈実験および第2章で得られた風力係数分布の時刻歴を用いた時刻歴応答解析を行い、壁面の振動中に発生する動的座屈特性を調査した。動的座屈は風上よどみ点での外圧が最大ピーク値をとるときに発生することを明らかにし、実現象では動的座屈荷重が静的座屈荷重を上回ることを示した。また、第3章の静的座屈荷重を用いて動的座屈荷重を安全側に評価可能であることを示し、静的座屈荷重評価式を提案した。

第5章では、オープントップオイルタンクに設置される補剛リングに関して、壁面の座屈を防止するために必要な設計指標を検討している。壁面の座屈に対してリングの曲げ剛性の影響が大きく、その傾向は壁面の曲げ剛性との比によって表されることを示した。また、リングが風荷重によって降伏しないための条件を提案した。

第6章では、第2章で得た風力係数分布の時刻歴を用いてオイルタンクの時刻歴応答解析を行い、壁面内に働く応力度の時刻歴を算出し、応力度の変動特性を調査した。一般的な仕様の範囲では、壁面に作用する主応力は小さく、供用期間中における疲労損傷は発生しないことを示した。

第7章では、オープントップオイルタンクおよび建設中の円筒形貯槽を対象として、耐風設計法をそれぞれ提案している。設計手法としては、設計の目的に合わせて手法を選択できるように、設計用風荷重を用いたFEM解析により設計する手法と静的座屈荷重の評価式を用いて補剛リングおよび壁面の板厚を決定する手法の2種類を示した。

第8章は結論である。

以上、要するに本論文は、オープントップオイルタンクおよび建設中の円筒形貯槽を対象とし、壁面に作用する風力特性を明らかにし、座屈・振動特性を適切に評価する耐風設計法を構築したものであり、円筒形貯槽の合理的な耐風設計ならびに強風被害低減に寄与するものである。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。